

我国煤矿瓦斯重特大事故树分析

游丽娟, 俞秀宝

(同济大学 经济与管理学院, 上海 200092)

摘要: 本文通过对 2002 年至 2013 年间 44 起重特大煤矿瓦斯爆炸事故进行统计, 按照事故树分析 (FTA) 的步骤, 绘制出了煤矿瓦斯爆炸事故树图, 运用事故树分析的方法, 按照演绎分析运用逻辑推理, 采用布尔代数法, 解算出煤矿瓦斯爆炸事故树的最小割集、最小径集, 找出了事故发生的可能途径, 确定各基本事件的结构重要度并加以分析, 了解了各基本事件在系统结构中所处的地位, 从事故树结构上来考虑各基本事件对事故的影响大小, 提出了预防煤矿瓦斯爆炸事故的有效措施。

关键词: 煤矿; 重特大瓦斯事故; 事故树; 最小割集; 最小径集; 结构重要度

Fault Tree Analysis for Major Coal Mine Gas Accidents in Mainland China

You Li-juan, Yu Xiu-bao

(School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: The paper presents a statistic analysis for 44 serious coal mine gas explosion from 2002 to 2013. A fault tree diagram of gas explosion is drawn according to the steps of fault tree analysis. Based on logical analysis for gas accident, minimal cut sets and minimal path sets are calculated by using the Boolean algebra simplifying method. A structural importance degree is determined which shows the status and impact of basic events to the whole gas accident system. Relevant measures to reduce and prevent gas accident are presented in the paper.

Keywords: coal mine, major gas accident, fault tree, minimal cut sets, minimal path sets, structural importance degree

1 引言

建国以来, 我国煤矿产量持续稳定的增长, 但是事故频繁发生一直是该行业面临的重大安全生产问题^[1]。2011 年, 在产量持续增长的情况下, 全国煤矿发生事故 1201 起、死亡 1973 人。2013 年我国煤矿百万吨死亡率为 0.293, 这是我国历史上该指标首次降到 0.3 以下。近年来, 通过采取多种举措解决煤矿安全生产问题, 总体上我国的煤矿安全生产形势呈现稳定好转的趋势, 2010 年煤矿百万吨死亡率为 0.749, 2011 年同比下降 24.7%, 2012 年下降 34%, 但我国煤矿的安全情况与世界先进产煤国家相比较仍存在很大的差距^[2], 如世界第二大产煤国的美国, 近几年来其百万吨死亡率为 0.03 左右。

煤矿事故中, 瓦斯仍然是威胁煤矿安全的第一杀手。对煤矿安全事故的控制是我国煤矿行业健康发展的一个重要研究课题。长期以来, 人们对煤矿事故的分析和管理, 主要凭借实践经验和判断能力。事故发生后, 如何有效地进行调查分析对寻找事故发生的原因和事故的有效预防至关重要。根据国家安全生产监督管理局发布的重特大事故信息, 2002 年至 2013 年期间, 在我国发生的 111 起煤矿重特大事故中, 瓦斯爆炸事故 49 起, 占 44.1%。本文以其中的 44 起瓦斯爆炸事故为研究对象, 进行事故统计并运用事故树分析法, 找出瓦斯爆炸事故发生的路径, 在此基础上, 提出有效的减少和预防此类事故发生的主要措施。

2 煤矿事故树分析法文献综述

事故树分析法, 也称故障树分析^[3], 这种方法是贝尔实验室的 H. A. Watson 在 1962 年发明的^[4]。事故树分析法在煤矿事故研究中的应用最早可追溯到 80 年代中期, 该方法通过

分析事故发生和发展的直接原因和间接原因及它们之间的逻辑关系，用逻辑树图表示出来，采用数理逻辑方法对事故进行定性分析和定量分析，预测事故发生的概率。事故树分析法不仅能分析出事故的直接致因，而且能深入地揭示出事故的潜在致因。由于这种方法具有形象直观、思路清晰、逻辑性强的特点，是事故调查分析非常有效的分析方法之一，是安全系统工程中广泛应用的重要方法之一^[5]，主要用于系统危险性的辨识和评价。

在煤矿事故分析方面，已有学者运用事故树分析法进行了一些研究。顾学明应用事故树分析方法对煤矿冒顶事故典型事例进行定性与定量分析，找出了冒顶事故发生的主要因素以及各因素之间的逻辑关系^[6]；郑丰隆等针对煤矿主井提升坠斗事故的发生原因和机理，用事故树安全分析方法，得出超载提升是造成坠斗事故的主要因素^[7]；刘鹏飞介绍了事故树分析方法，并结合具体案例，对事故发生的原因进行了分析，有针对性地制定整改措施^[8]。

在煤矿瓦斯事故分析中，单亚飞等在 1995 年，通过对 4 9 起煤矿瓦斯爆炸典型案例进行的统计，运用事故树分析法，找出了事故发生的可能途径，提出了预防事故的对策^[9]。我们发现单亚飞等对瓦斯爆炸事故的统计中，关于瓦斯积聚的原因主要根据事故发生的地点来进行汇总，比如工作面、掘进面、巷道等，我们认为这样的分类对找到事故发生的直接原因不是特别有效。另外，时隔 20 年后瓦斯事故是否呈现出新的变化？本文拟在对瓦斯积聚的具体原因进行分类统计基础上，对 2002-2013 年期间发生的 44 起重特大瓦斯事故，进行事故树分析，找出事故发生的途径，并提出预防措施。

3 煤矿瓦斯爆炸事故统计

根据国家安全生产监督管理总局发布的重特大事故信息，我们对近年来 44 起瓦斯爆炸事故原因的分析进行统计，发生瓦斯爆炸的瓦斯积聚和火源情况见表 1 和表 2。

表 1 瓦斯积聚统计表

原因分类			次数	百分比 (%)	
通风不良			31	70.5%	
其中	局部通风处理不当	瓦斯检查员脱岗	1	2.3%	
		风量不足	超通风能力安排作业	2	4.5%
			违章巷道式采煤	2	4.5%
			工作面风流短路	2	4.5%
		风流阻塞	关键连接处封闭	1	2.3%
			大块煤矸堵塞溜煤道	1	2.3%
		通风机停机	违章	4	9.1%
			停电	3	6.8%
	冒顶		2	4.5%	
	通风系统混乱	串联通风		1	2.3%
		风流短路		2	4.5%
		设施不完善		2	4.5%
		通风系统不合理		1	2.3%
		系统漏风	采空区漏风	1	2.3%
越界开采			1	2.3%	
循环风	局部通风机安装位置不当	4	9.1%		
	违章独眼井开采	1	2.3%		
瓦斯涌出			13	29.5%	
其中	采空区漏风	未处理采空区漏风	2	4.5%	
		冒顶	1	2.3%	

放炮后瓦斯涌出	2	4.5%
地质变化	3	6.8%
冒顶	1	2.3%
掘通老窖	1	2.3%
其他密闭失修	3	6.8%
合计	44	100.0%

表 2 火源统计表

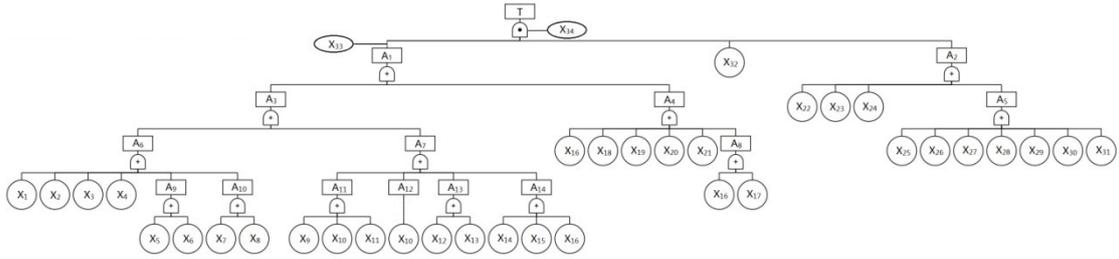
类型		次数	百分比 (%)
电火花		21	47.7%
其中	开关冒火	1	2.3%
	非矿用设备引火	2	4.5%
	电缆短路	7	15.9%
	失爆引火	5	11.4%
	带电检修	4	9.1%
	电机车火花	1	2.3%
	放炮发爆器短路	1	2.3%
违章放炮火源		14	31.8%
摩擦撞击火花		5	11.4%
煤炭自燃火花		4	9.1%
合计		44	100.0%

4 煤矿瓦斯爆炸事故树的构建

事故树是由各种事件、逻辑门连接构造而成的，该方法从一个人所不希望发生的结果开始，逐层往下分析，寻求引起结果事件（即顶上事件）发生的触发事件、事故的直接原因和间接原因，直到寻找到基本事件，是一种逆时序的分析方法。所谓顶上事件，即人们所不期望发生的事件，也是所要分析的对象事件。

事故树的构建是在事故发生原因分析的基础上，依靠顶上事件的选取原则及事故树分析方法的有关理论知识进行的。首先确定事故的顶上事件，从顶上事件出发，按照演绎分析的方法，运用逻辑推理，层层深入地分析，找出导致顶上事件发生的中间事件和基本事件及其关系，并加以分析整理，按照逻辑关系，用逻辑门连接输入关系，最后得出完整的事故树图。由此可在清晰的事事故树图形下，表达系统内各事件间的内在联系，并指出单元故障与系统事故之间的逻辑关系，便于找出系统的薄弱环节。

根据事故树编制的基本程序及表 1、表 2 分析的结果，将瓦斯爆炸作为顶上事件，然后围绕瓦斯爆炸事故逐层分析，依据各原因事件以及它们之间的逻辑关系，我们绘制了瓦斯爆炸事故树图（图 1 所示）。



T—瓦斯爆炸；A₁—瓦斯积聚；A₂—火源；A₃—通风不良；A₄—瓦斯涌出；A₅—电火花；A₆—通风系统混乱；A₇—局部通风处理不当；A₈—采空区漏风；A₉—系统漏风；A₁₀—循环风；A₁₁—风量不足；A₁₂—工作面风流短路；A₁₃—风流阻塞；A₁₄—通风机停机；X₁—串联通风；X₂—风流短路；X₃—设施不完善；X₄—通风系统不合理；X₅—越界开采；X₆—采空区漏风；X₇—违章独眼井开采；X₈—局部通风机安装位置不当；X₉—瓦斯检查员脱岗；X₁₀—超通风能力安排作业；X₁₁—违章巷道式采煤；X₁₂—关键连接处封闭；X₁₃—大块煤矸堵塞溜煤道；X₁₄—违章；X₁₅—停电；X₁₆—冒顶；X₁₇—未处理采空区漏风；X₁₈—放炮后瓦斯涌出；X₁₉—地质变化；X₂₀—掘通老窑；X₂₁—其他密闭失修；X₂₂—违章放炮火源；X₂₃—摩擦撞击火花；X₂₄—煤炭自然火花；X₂₅—开关冒火；X₂₆—非矿用设备引火；X₂₇—电缆短路；X₂₈—失爆引火；X₂₉—带电检修；X₃₀—电机车火花；X₃₁—放炮发爆器失爆；X₃₂—氧气；X₃₃—未采取措施瓦斯浓度达到 5%-16%；X₃₄—未及时处理

图 1 瓦斯爆炸事故树图

5 煤矿瓦斯事故定性分析

事故树定性分析的目的在于明确哪些基本事件或基本事件的组合与顶上事件的发生存在着重要关系^[9]。事故树定性分析的步骤是依据构建的事故树图，运用布尔代数进行简化，经解算求出事故树的最小割集和最小径集，确定各基本事件的结构重要度并加以分析。

事故树的最小割集是指导致顶上事件发生的最起码的基本事件的集合，表示系统的危险性^[10]。最小径集是指使顶上事件不发生的最低限度的基本事件的集合，表示系统的安全性。在事故树分析中，求最小径集是利用其与最小割集的对偶关系，先画出事故树的对偶树——成功树，然后用布尔代数求最小径集。结构重要度反映了各基本事件在系统结构中所处的地位及对系统故障影响的大小。

对瓦斯爆炸事故树的定性分析，通过对其最小割集和最小径集的求解，确定各基本事件的结构重要度，从而了解系统的危险程度和安全程度，掌握导致事故发生的各基本原因事件的组合关系及其重要程度。

5.1 求最小割集

最小割集是导致瓦斯爆炸事故的充分而不必要的基本事件的集合。由图 1 可知，引起瓦斯爆炸事故的基本事件为 34 个。利用布尔代数法简化图 1 所示的事故树就可以求出事故树最小割集，图 1 的布尔代数法表达式为

$$\begin{aligned}
 T &= A_1 A_2 X_{32} X_{33} X_{34} = \\
 &= (A_3 + A_4) \cdot (X_{22} + X_{23} + X_{24} + A_5) \cdot X_{32} \cdot X_{33} \cdot X_{34} = \\
 &= [(A_6 + A_7) + (A_8 + X_{18} + X_{19} + X_{16} + X_{20} + X_{21})] \cdot [X_{22} + X_{23} + X_{24} + (X_{25} + X_{26} + X_{27} + X_{28} + X_{29} + X_{30} + X_{31})] \cdot X_{32} \cdot X_{33} \cdot X_{34} = \\
 &= (X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + A_9 + A_{10} + A_{11} + A_{12} + A_{13} + A_{14} + X_{16} + X_{17} + \\
 &+ X_{18} + X_{19} + X_{16} + X_{20} + X_{21}) \cdot (X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26} + X_{27} + X_{28} + X_{29} + X_{30} + X_{31}) \cdot X_{32} \cdot X_{33} \cdot X_{34} = \\
 &= (X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{10} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{16} + X_{17} + \\
 &+ X_{18} + X_{19} + X_{16} + X_{20} + X_{21}) \cdot (X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26} + X_{27} + X_{28} + X_{29} + X_{30} + X_{31}) \cdot X_{32} \cdot X_{33} \cdot X_{34}
 \end{aligned}$$

式中：T 为事故树的顶上事件煤矿瓦斯爆炸，A₁-A₁₄ 为事故树的中间事件，X_i 为事故树的基

本事件, $i=1, 2, \dots, 33, 34$ 。

运用布尔代数运算规律, 可以得出该事故树有 210 个最小割集。

瓦斯爆炸事故的事故树最小割集有 210 组, 其中只要任何一组的基本事件同时发生, 顶上事件就必然发生, 说明顶上事件发生的路径有 210 个, 分别为:

$\{X_1, X_{22}, X_{32}, X_{33}, X_{34}\};$

$\{X_1, X_{23}, X_{32}, X_{33}, X_{34}\};$

.....

$\{X_{21}, X_{30}, X_{32}, X_{33}, X_{34}\};$

$\{X_{21}, X_{31}, X_{32}, X_{33}, X_{34}\}。$

5.2 求最小径集

在煤矿瓦斯爆炸事故的分析研究中, 最关心的是如何防止瓦斯积聚和火源的发生, 以便进行有效的安全管理。就实质而言, 径集就是割集的对偶。事故树的对偶树就是成功树。其具体做法就是将事故树中所有的与门变成或门, 所有的或门变成与门。经这样的变换, 所求出成功树的最小割集就是原来事故树的最小径集。成功树的逻辑函数为

$$\begin{aligned} T' &= A_1' + A_2' + X_{32}' + X_{33}' + X_{34}' = \\ & (A_3' A_4') + (X_{22}' X_{23}' X_{24}' A_5') + X_{32}' + X_{33}' + X_{34}' = \\ & [(A_6' A_7') \cdot (A_8' X_{18}' X_{19}' X_{16}' X_{20}' X_{21}')] \\ & + [X_{22}' X_{23}' X_{24}' \cdot (X_{25}' X_{26}' X_{27}' X_{28}' X_{29}' X_{30}' X_{31}')] + X_{32}' + X_{33}' + X_{34}' = \\ & (X_1' X_2' X_3' X_4' A_9' A_{10}') \cdot (A_{11}' A_{12}' A_{13}' A_{14}') \cdot (X_{16}' X_{17}' X_{18}' X_{19}' X_{16}' X_{20}' X_{21}') + X_{22}' X_{23}' X_{24}' \\ & X_{25}' X_{26}' X_{27}' X_{28}' X_{29}' X_{30}' X_{31}' + X_{32}' + X_{33}' + X_{34}' = \\ & X_1' X_2' X_3' X_4' X_5' X_6' X_7' X_8' X_9' X_{10}' X_{11}' X_{10}' X_{12}' X_{13}' X_{14}' X_{15}' X_{16}' X_{16}' X_{17}' X_{18}' X_{19}' X_{16}' X_{20}' X_{21}' + \\ & X_{22}' X_{23}' X_{24}' X_{25}' X_{26}' X_{27}' X_{28}' X_{29}' X_{30}' X_{31}' + X_{32}' + X_{33}' + X_{34}' = \\ & X_1' X_2' X_3' X_4' X_5' X_6' X_7' X_8' X_9' X_{10}' X_{11}' X_{12}' X_{13}' X_{14}' X_{15}' X_{16}' X_{17}' X_{18}' X_{19}' X_{20}' X_{21}' + X_{22}' X_{23}' X_{24}' \\ & X_{25}' X_{26}' X_{27}' X_{28}' X_{29}' X_{30}' X_{31}' + X_{32}' + X_{33}' + X_{34}' \end{aligned}$$

式中: T' 为事故树的顶上事件煤矿瓦斯爆炸的补事件, $A_1' - A_{14}'$ 为事故树的中间事件的补事件, X_i' 为事故树的基本事件的补事件, $i=1, 2, \dots, 33, 34$ 。

运用布尔代数运算规律, 可以得出成功树有 5 个最小割集, 即煤矿瓦斯爆炸事故树有 5 组最小径集。

事故树的最小径集有 5 组, 其中任何一组最小径集的基本事件都不发生, 顶上事件就不可能发生, 因此, 这个系统的控制途径有 5 个, 分别为

$\{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}, X_{17}, X_{18}, X_{19}, X_{20}, X_{21}\};$

$\{X_{22}, X_{23}, X_{24}, X_{25}, X_{26}, X_{27}, X_{28}, X_{29}, X_{30}, X_{31}\};$

$\{X_{32}\}$

$\{X_{33}\};$

$\{X_{34}\}。$

5.3 求基本事件的结构重要度

在事故树中, 各基本事件所处的地位不同, 其对顶上事件的影响也不同。根据各基本事件的发生对顶上事件所产生的影响程度, 可以采取相应的措施, 有效控制煤矿爆炸事故的发生。

结构重要度的分析有多种方法, 应用较多的是根据最小割集或最小径集来判断各基本事件的结构重要度的大小, 因此可以得出煤矿瓦斯爆炸事故中各基本事件结构重要度大小 I 的排列顺序为

$$I_{32} = I_{33} = I_{34} > I_{22} = I_{23} = I_{24} = I_{25} = I_{26} = I_{27} = I_{28} = I_{29} = I_{30} = I_{31} >$$

$I_1=I_2=I_3=I_4=I_5=I_6=I_7=I_8=I_9=I_{10}=I_{11}=I_{12}=I_{13}=I_{14}=I_{15}=I_{16}=I_{17}=I_{18}=I_{19}=I_{20}=I_{21}$

5.4 结果分析

从 44 起瓦斯爆炸事故树图的逻辑门构成比来看,逻辑或门个数占 92.3%,说明单个事件发生并产生结果的可能性很大,逻辑与门个数占 7.7%,说明只有少数基本事件同时发生才产生结果,所以煤矿瓦斯爆炸事故发生的可能性是比较大的,即危险性很大。

44 起瓦斯重特大事故研究显示,事故树中最小割集有 210 组,即发生事故可能的途径有 210 种,而最小径集只有 5 组,远小于最小割集的数量,因此才导致了这些重特大事故的发生。由于本研究对瓦斯积聚按具体原因分类,因此求出的最小割集大于单亚飞等在 1995 年求解出的 154 组最小割集。

根据结构重要度的计算可知,基本事件“氧气浓度适当、瓦斯浓度达到 5%-16%”以及“发现瓦斯积聚和火源但未及时处理”时,对顶上事件影响较大,基本事件“违章放炮火源”、“摩擦撞击火花”等次之。

6 煤矿瓦斯事故预防措施

由上述分析可知,瓦斯爆炸事故的原因主要是对危险源的管理不当造成的,事故的发生是多个不安全因素共同作用的结果,因此在管控措施上,可以把降低结构重要度大的基本事件(“氧气浓度适当、瓦斯浓度达到 5%-16%”、“发现瓦斯积聚和火源但未及时处理”、“违章放炮火源”、“摩擦撞击火花”等)作为工作的重点。

上述煤矿瓦斯爆炸事故树分析为预防瓦斯事故的发生提供了理论依据,指出了有效的预防措施。我们应在充分认识客观规律的基础上,从主要矛盾入手,采取综合预防措施,减少和防止煤矿瓦斯爆炸事故的发生。我们可以着重做好以下几点:

- (1) 采取安全技术措施,采用煤矿专用安全设备,加强设备管理,保持设备良好性能,对瓦斯浓度进行有效监控。
- (2) 加强现场施工管理,严格遵守采掘施工顺序,杜绝违章现象,减少和预防煤矿施工过程中意外火源的发生,消除煤矿事故隐患。
- (3) 完善煤矿安全生产管理体制,严格执行安全生产责任追究制度,加大安全检查和监督力度,预防煤矿事故的发生。
- (4) 加强企业安全文化建设,加大安全投入,强化煤矿作业人的安全意识和自我保护意识,提高职工安全素质。

作者简介: 游丽娟(1990—),女,甘肃天水人,同济大学在读硕士研究生,主要研究方向为技术创新、安全管理等。Tel: 13764542837, E-mail: youlijuan2012@163.com。
俞秀宝(1962—),女,上海市人,澳大利亚昆士兰大学管理学博士,同济大学经济与管理学院副教授,主要研究方向为事故致因、知识管理、技术管理等。Tel: 021-65989287, E-mail: yuxb@tongji.edu.cn。

参考文献

- [1]俞秀宝,江文昌.我国煤矿安全事故原因系统分析与对策[J].煤炭科学技术,2007,35(1):104-108.
- [2]韩斌君,俞秀宝.我国煤矿安全事故致因研究[J].煤炭工程,2006,(9):65-67.
- [3]张玲,陈国华.事故调查分析方法与技术述评[J].中国安全科学学报,2009,19(4):169-176.
- [4]CHEN Jian-min,YANG Ren-shu. Analysis of Mine Water Inrush Accident Based on FTA [J].

Procedia Environmental Sciences, 2011, 11:1550-1554.

[5]李俊禄,李刚,车彦峰.基于 FTA 的煤矿瓦斯事故分析[J]. 工矿自动化, 2010,(11):40-43.

[6]顾学明.基于 FTA 的煤矿冒顶事故危险源辨识[J]. 资源与产业, 2010,12(S1):139-142.

[7]郑丰隆,赵海涛,郑效田.煤矿主井提升系统坠斗事故的 FTA 分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2008, 27(5):32-36.

[8]刘鹏飞.事故树分析法在煤矿事故预防和事故原因调查中的应用[J].煤矿安全, 2009, (11):121-123.

[9]单亚飞,贾德祥,王树刚,等.用故障树分析煤矿瓦斯爆炸引起的伤亡事故[J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版), 1995, 14(2):12-16.

[10]汪元辉.安全系统工程[M]. 天津:天津大学出版社, 1999.